

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

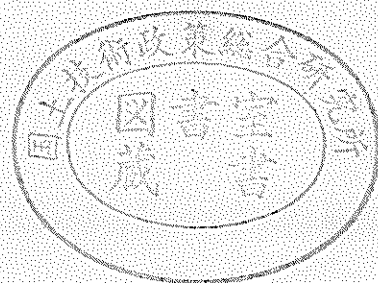
資料係
文献複写
禁止出

VOL. 9

NO. 2

JUNE 1970

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第9巻 第2号 (Vol. 9, No. 2), 1970年6月 (June 1970)

目 次 (CONTENTS)

1. 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算 (第6報)
——港口損失係数の影響——……………伊藤喜行・木原 力…… 3
(Digital Computation on the Effect of Breakwaters Against Long-period waves (6th Report)—On the Head-loss Coefficient at the Tsunami-Breakwater Opening—
……………Yoshiyuki ITO and Tsutomu KIHARA)
2. 偏心傾斜荷重を受ける粘性土地盤上の基礎の支持力
……………中瀬明男・小林正樹…… 23
(Bearing Capacity of Foundation on Cohesive Soil under Eccentric and Inclined Loads…………… Akio NAKASE and Masaki KOBAYASHI)
3. 航空機タイヤの平均接地圧に関する一考察
……………須田 颯・佐藤勝久・阿部洋 …… 39
(A Study on the Average Contact Pressure of Airplane Tires
…………… Hiroshi SUDA, Katsuhisa SATO and Yoichi ABE)
4. 海岸堤防の大型模型振動実験と円形すべり安定計算
……………土田 肇・野田節男・倉田栄 …… 61
(Vibration Test and Circular Arc Analysis for Full-scale Models of Levee
…………… Hajime TSUCHIDA, Setsuo NODA and Eiichi KURATA)
5. 矢板壁の耐震性に関する研究 (第2報)
——矢板壁模型の振動数特性——…荒井秀夫・藤野芳明・坂井慧子……123
(On the Earthquake Resistance of Anchored Sheet-Pile Walls (2nd Report)—Frequency Characteristics of Model Anchored Sheet-Pile Walls—
……………Hideo ARAI, Yoshiaki FUJINO and Keiko SAKAI)
6. 水噴流による水中の岩盤の掘削特性について
——ノズル移動時のモルタル試料掘削について——
……………藤井喜一郎・守口照明……147
(On the Excavation Characteristic of Rocks in the Water by Water-jets
…………… Kiichiro FUJII and Teruaki MORIGUCHI)

6. 水噴流による水中の岩盤の掘削特性について

——ノズル移動時のモルタル試料掘削について——

藤井喜一郎*・守口照明*

要 旨

近年港湾工事における浚渫部門において、岩盤、硬土盤の浚渫作業を能率的に行なうことが、重要な課題となっている。このような地域では、現在特別な作業船によって浚渫作業を行なっているが、その作業は非能率で、かつ非常に困難を伴う場合が多い。そのため、海底の岩盤を能率よく破碎する他の方法の開発が急がれているが、本報告では、その一つの方法として高圧噴流水を利用した水中での岩盤破碎方法について、その実験の結果を紹介したものである。

本実験は、圧力 $10 \sim 47 \text{ kg/cm}^2$ の範囲の水噴流により、模擬岩盤として製作したモルタル試料を実験水槽内で掘削したもので、実験結果から、平均掘削深さ \bar{l} (cm)、ノズル出口動圧 H_0 (kg/cm^2)、ノズル口径 d (cm)、ノズルから試料までの距離 L (cm)、ノズル移動速度 v (cm/sec)、試料の圧縮強度 σ_c (kg/cm^2) との関係を表わす次のような実験式を得た。

$$\bar{l} = (-0.39L - 3.1v + 11.8) \left(\frac{2H_0}{\sigma_c} - 0.7 \right) d^{1.7} \text{ [cm]}$$

また試料の同一個所を N 回繰り返し掘削を行なった場合、最初の1回で掘削される平均掘削深さを \bar{l}_1 とし、 N 回掘削したときの平均掘削深さを \bar{l}_N とすると、

$$\bar{l}_N = \bar{l}_1 \cdot N^{0.37}$$

の関係が存在することが明らかになった。

また、上記実験式を応用して、掘削面積を最大にさせるためのノズル移動速度、単位エネルギーで掘削深さを最大にさせるときの、ノズル出口動圧について検討した。

* 機材部 作業船研究室

6. On the Excavation Characteristic of Rocks in the Water by Water-jets

Kiichiro FUJII*

Teruaki MORIGUCHI*

Synopsis

Today in the dredging operation fields of port and harbour constructions, one of the most important problems is how to carry out efficient dredging operations for rocks and hard soils.

For the dredging operations at these areas, special dredgers are used; but the operation of these dredgers are often insufficient, and there are many areas in which it is difficult for these dredgers to work.

Accordingly, we have to develop some other methods of efficient destruction of the rocks in the sea bottom.

In this report, the author presents the method of destructing rocks by high-pressure water jets, and showed some experimental results of them.

The pressure of water-jets used in this experiment was from 10 kg/cm² to 47 kg/cm², and the model rocks (mortar-test-pieces) used in this experiment was made in the laboratory and were excavated by water-jets in the water tank.

From the experimental results, we got following experimental equation

$$\bar{l} = (-0.39L - 3.1v + 11.8)(2H_0/\sigma_c - 0.7)d^{1.7} N^{0.33}$$

where

\bar{l} = Average excavated depth (cm)

H_0 = Pressure of the water jets at the tips of the nozzles (kg/cm²)

d = Diameter of nozzle (cm)

L = Distance between the tip of the nozzle and the surface of the test-pieces,

v = Moving speeds of nozzle (cm/sec)

σ_c = Compressive strength of the model test-pieces (kg/cm²)

N = Number of the times of excavation operation

This equation can be applicable under following conditions.

$$1 \leq L \leq 20 \text{ (cm)}, 0.25 \leq v \leq 3.0 \text{ (cm/sec)}, 26.5 \leq \sigma_c \leq 76.5 \text{ (kg/cm}^2\text{)},$$

$$10.0 \leq H_0 \leq 47.0 \text{ (kg/cm}^2\text{)}, 6 \leq d \leq 2 \text{ (cm)}$$

* Research Staff of Dredger and Construction Equipment Laboratory.

目 次

要 旨	147
まえがき	151
1. 実験装置および破碎試料	151
1.1 実験方法および装置の概要	151
1.2 実験装置	151
1.3 破碎用モルタル試料	153
2. モルタル掘削実験	154
2.1 実験の目的	154
2.2 実験の内容	155
2.3 ノズル移動掘削を繰り返し行なった場合の掘削深さ l_N と繰り返し数 N との関係について	160
3. 実験式についての応用	161
3.1 一定量のエネルギーで掘削面積を最大にさせるための、ノズル移動速度について	161
3.2 単位水エネルギーで、最大の掘削深さを得るための噴流水の動圧と試料の圧縮強度との関係について	161
4. ま と め	162
5. 参考文献	162

1. まえがき

高压噴流水により岩石を破碎する試みは、現在わが国およびソ連、米、英、国などで、一般土木工事および石炭、鉍石の採掘などに行なわれており、かなりの成果を得ている。しかし、これらの多くは空中での試みであり、水中で実施した例は少ない。

当港湾技術研究所機材部では、海底の岩盤、硬土盤を効果的に破碎する手段として、高压噴流水による水中での岩石破碎に関する実験を行ってきた。

本報告では、従来までの実験結果を総合的に検討する意味で、破碎実験用模擬岩石として種々のモルタル試料を使用してノズル出口付近の動圧、モルタル試料の圧縮強度、ノズル口径、ノズル移動速度、ノズルから試料岩石表面までの距離等を種々変化させ、これらの変化量と水噴流による試料の平均掘削深さの変化の関係を実験により求めた。水中での高压水による岩石の破碎現象を上記に示した各条件を変化させた場合について、理論的に解明することは非常に困難である。ここでは実験結果から簡明な実験式を導いてそれらの関係を表現し実用上の便宜をはかった。さらにここでは、ノズルを1回移動して掘削する場合と、1回以上同一場所を繰り返して掘削する場合についての比較、また掘削深さに対する消費エネルギーについての解析も試みた。

1. 実験装置および破碎試料

1.1 実験方法および装置の概要

実験は、高压タービンポンプで高压水を発生させ、これを管路で水槽内の水中に固定したノズルへと導く。ポンプで発生する圧力は流量によって変化するので、図-1に示す位置にある圧力調整用の弁の開閉により任意の圧力（ただし 47 kg/cm^2 以下）を得ることができる。破碎用の模擬岩盤としてのモルタルは試料台車、および試料固定台によってノズルの真下にセットされる。

1.2 実験装置

a) 高压ポンプ

10段タービンポンプで常用吐出圧力 40 kg/cm^2 、吐出流量 690 l/min 、駆動電動機出力 75 KW 。

b) 圧力調整用バルブ

圧力水主管から分岐したバイパスを設け、その途中にこのバルブを設け、適量の圧力水を水槽に放出することにより、ポンプの吐出量を変化させて、実験に必要な圧力にセットする。

c) ノズル

図-2に示すような全長 8 cm 、出口口径が 0.6 cm 、 1.0 cm 、 1.5 cm 、 2.0 cm の4種類のノズルを使用した。これらのノズルの出口付近の平行部分の長さは、いずれも口径の1.5倍で（ $2 \text{ cm}\phi$ のものを除く）、材質はステ

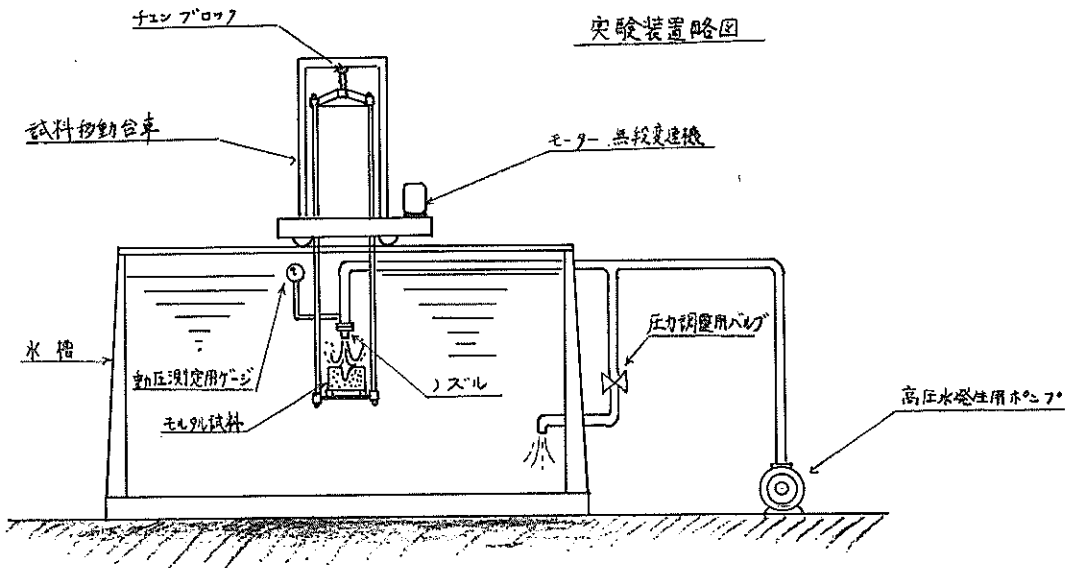


図-1 実験装置略図

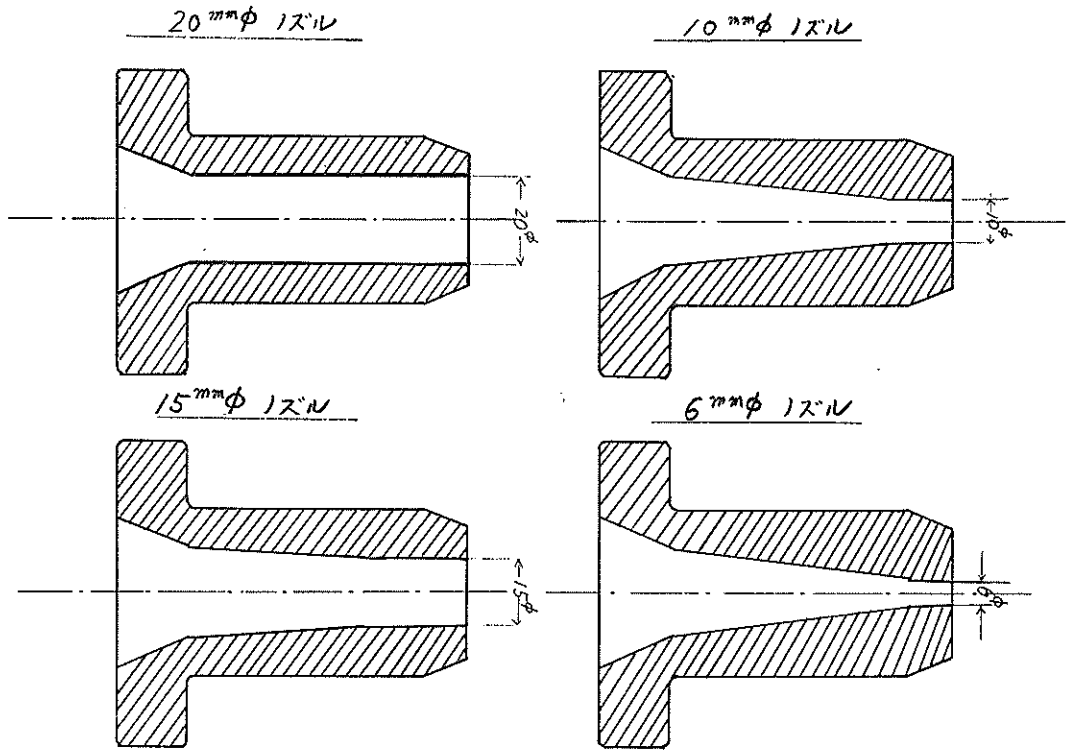


図-2 使用したノズル

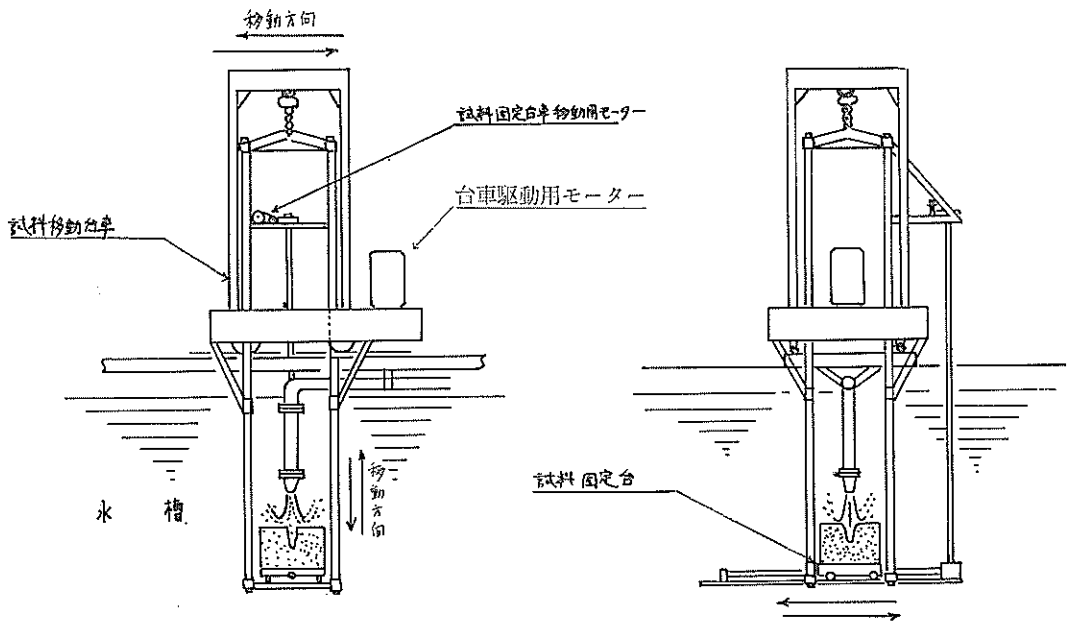


図-3 移動台車および試料固定台

ステンレス鋼 (SUS-27) である。

d) 水槽

水槽は直径 5m, 深さ 4m でノズルは図-1 に示すように, 水槽のほぼ中央部の水面から約 1m の深さに位置する。

e) 掘削用モルタル試料移動台車, および固定台

これらは水槽内の水中にあるモルタル試料に, 水噴流により掘削溝をつくるために, 試料をノズル真下の適当な位置に固定する固定台, およびこの固定台を乗せたまま, 噴流の軸方向および直角方向に移動させる移動台車である。すなわち, 実験はノズルを移動させて掘削したのではなく, 試料を移動させることにより試料に掘削溝を作った。移動台車は, モーター, および無段変速機, Vベルト, プーリーにより, 0.25cm/sec~3.0cm/sec の範囲で速度を変化させることができる。またノズルから, 試料表面までの距離 Lは, 0~35cm の範囲で調整できる (図-3 参照)。

1.3 破碎用モルタル試料

本実験では, 掘削する岩石の圧縮強度と掘削深さとの関係を調査することが重要な目的の一つであるから, 掘削用岩石としては圧縮強度が種々異なっているものを使用するのが望ましい。しかし天然の岩石のなから, 本実験に使用した高压ポンプの発生する圧力水で, 具合

よく掘削され得るものを種々見つけることは困難であるし, それらの強度測定も容易でない。そこで破碎用試料としては, 製作方法によりある程度強度を変化させることが可能なモルタル試料を実験室内で製作して使用した。

モルタル試料は, その構成材料となる砂, 砂利, セメント, 水の配合比, 養生期間等を変化させることにより, かなり広範囲の圧縮強度のものを製作することが可能である。そこで本実験では各モルタルの構成材料となる砂は, 粒径を変化させたり, 砂利 (本実験では直径 5~10mm のものを使用) は, その配合比を変えたりして次のような 4 種類の構成材料のモルタルをセメント, 水等の配合比を変えて製作し, 各々の試料で掘削深さに変化があるかどうかを実験により確かめた。

a) 全然砂利を含まないモルタルで, 極めて粒子の径が小さい砂 (細砂) を, セメントと水の配合比を変化させて適宜配合したブロック群 (図-4 の粒径加積曲線参照)。

b) a) と同じく砂利を含まず, 粒度が細砂および粗砂 (図-4 参照) で構成された砂に, セメントと水の配合比を適宜に変化させて製作したブロック群。

c) 砂利を含み, 細砂とセメント, 水の配合比を変化させて適宜配合して製作したブロック群 (図-4 参照)。

d) 粗砂と砂利, セメントの配合比を適宜に変化させ

- | | | |
|-----|-----|-------|
| (a) | —○— | 細砂 |
| (b) | —X— | 粗砂 |
| (c) | —●— | 細砂+砂利 |
| (d) | —△— | 粗砂+砂利 |

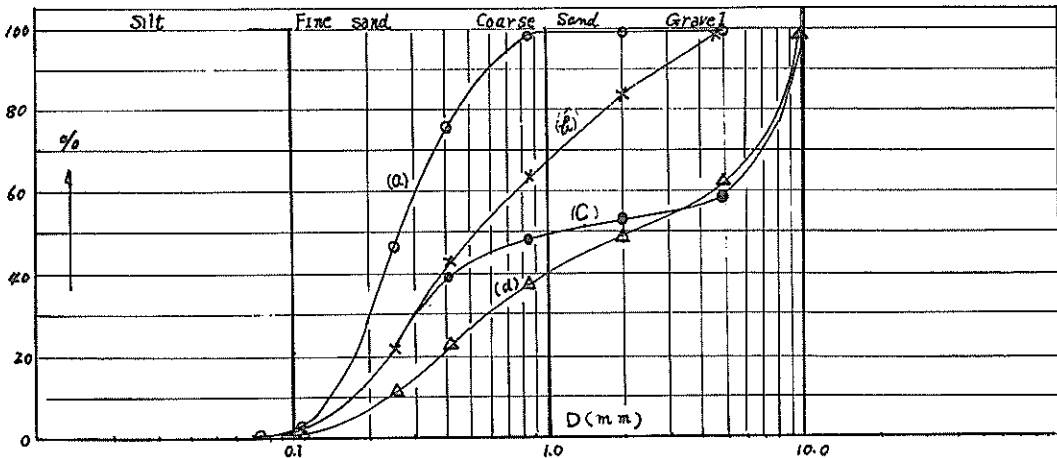


図-4 モルタル試料作成に使用した砂, 砂利の粒径加積曲線

表-1 平均圧縮強度表 (kg/cm²)

グループ	回数			モルタル構成材料
	1回	2回	1, 2回の平均	
A	24.5	26.8	25.6	a
B	29.8	32.8	31.3	a
C	39.5	41.5	40.5	b
D	50.5	51.8	51.1	c
E	62.3	60.4	61.3	d
F	75.0	76.5	75.6	a

て製作したブロック群 (図-4 参照)。

以上、4種の構成材料および製作方法で試料を製作した各モルタル試料は、強度、種類により次の6個のグループに分け、各グループとも1回に1~2個ずつ、2回に分けて、大きさ60cm×50cm×30cmのものを製作した。表-1は、それらのモルタル群のそれぞれの平均圧縮強度である。

2. モルタル掘削実験

2.1 実験の目的

高圧水により海底の岩盤を破碎するにあたり、ノズルを固定させて掘削するよりまずノズルを移動させて掘削能率を高めることが考えられるであろう。そのために本実験では、表面が水平なモルタル試料をノズルの中心軸に直角な位置におき、高圧水を試料に直角に衝突させて試料を噴流軸に対して直角に直線的に移動することにより溝を作り、その溝の平均の深さ (\bar{l}) と、噴流の出口動圧 (H_0)、岩石の圧縮強度 (σ_0)、ノズルから試料までの距離 (L)、ノズル口径 (d) との間の相対的な関係を実際の破碎状態から推察していくことが主要な目的である。

すなわち、掘削される溝の平均深さ \bar{l} と他の各変数との間には、何等かの関数関係が存在すること、

$$\bar{l} = F(H_0, L, d, \nu, \sigma_0)$$

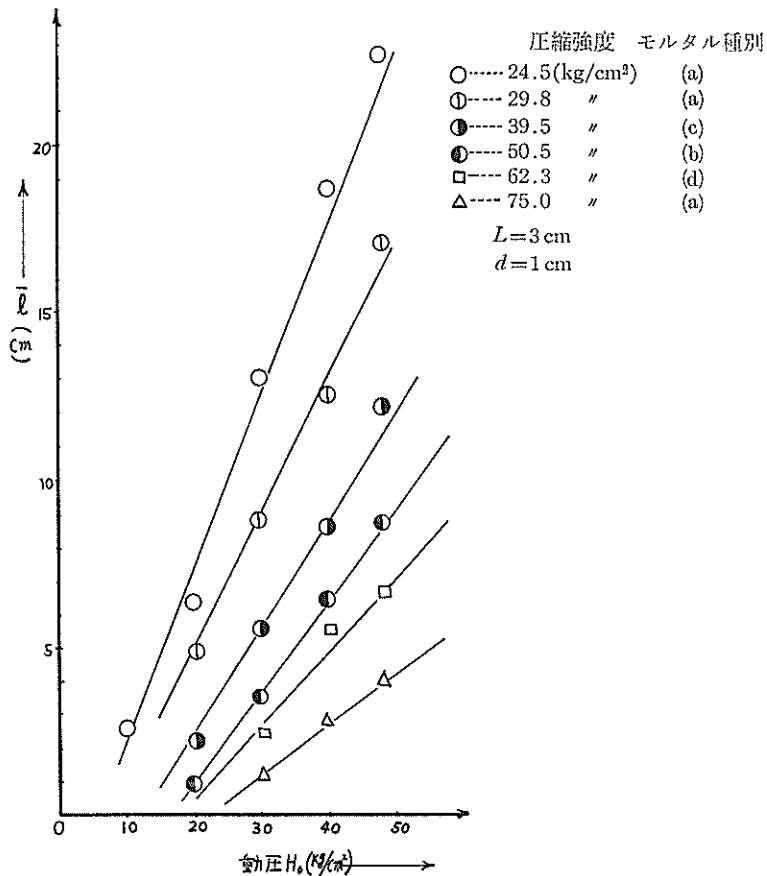


図-5 掘削平均深さ \bar{l} と動圧 H_0 との関係

そして、この関数 F を決定することが本実験の目的である。そこで、 \bar{l} とこれらの変数の一つ一つについて掘削実験を行ない、 \bar{l} との関係をそれらの結果から F を決定する。

2.2 実験の内容

a) 掘削深さ \bar{l} と、動圧 H_0 、圧縮強度 σ_c との関係について

高压噴流水によるモルタル試料掘削実験によって、次のような実験結果が得られた。すなわち、図-5 は動圧 H_0 の変化による掘削された溝の平均深さの変化を、各強度、各種類のモルタル試料について実験した結果である。ここでは、ノズルから試料までの距離 L は 3cm とし、移動速度 v は 1cm/sec とした。使用したノズル口径 d は 1.0cm である。

ここで、 L の長さについて検討してみるなら、ノズル出口の動圧については、筆者の過去の実験では動圧の維持できる区間は、 $4d$ 前後の長さであるから¹⁾、このノズルでは出口付近の動圧とノズルより 3cm 前後離れたところでもほとんど動圧の差はない。そこでこの距離での噴流の動圧を H_0 と表わし、 \bar{l} と H_0 との関係を各強度のモルタル試料について 図-5 で表わした。

次に、この図から \bar{l} と H_0 と σ_c との間関係を調べてみよう。筆者等がいままで行なってきたところの実験によれば¹⁾、破碎されるモルタル試料の圧縮強度 (σ_c)

と噴流の動圧 (H_0) (ただし、 $H_0=40\sim 50\text{ kg/cm}^2$) の間には、ノズル径が $d=9\sim 13\text{ mm}$ のノズルを用いた場合、

$$H_0 \approx \sigma_c / 2$$

の関係があることが知られている。すなわち圧縮強度が $30\text{ kg/cm}^2 \sim 90\text{ kg/cm}^2$ のモルタル試料については、動圧の約 2 倍前後の値をもつモルタル試料の破碎が可能であった。したがって $(2H_0 - \sigma_c)$ と \bar{l} とは、何等かの関係があると考えられ、また 図-5 から圧縮強度の高い試料ほど \bar{l} と H_0 の関係を表す直線の傾きが減少し、破碎に必要な動圧が高くなることから、 \bar{l} と $(2H_0 - \sigma_c) / \sigma_c$ との関係がどうなるのかを調査してみた。

図-6 は、 \bar{l} と $(2H_0 - \sigma_c) / \sigma_c$ との関係を示したものである。この図では、主として 図-5 の各プロットを用いて表わしてあるが、後に示す実験結果をも併せてプロットしてある。すなわち 図-5 では、 $L=3\text{ cm}$ 、 $v=1\text{ cm/sec}$ の場合のみの結果であるが、図-6 には L 、 v がそれぞれ他の一定の値をとるときの場合も示してある。この 図-6 から明らかなように、 \bar{l} と $(2H_0 - \sigma_c) / \sigma_c$ とには、

$$\bar{l} \propto \left\{ \frac{2H_0 - \sigma_c}{\sigma_c} + 0.3 \right\} = (2H_0 / \sigma_c - 0.7) \quad \dots\dots (2.1)$$

の関係が存在する。

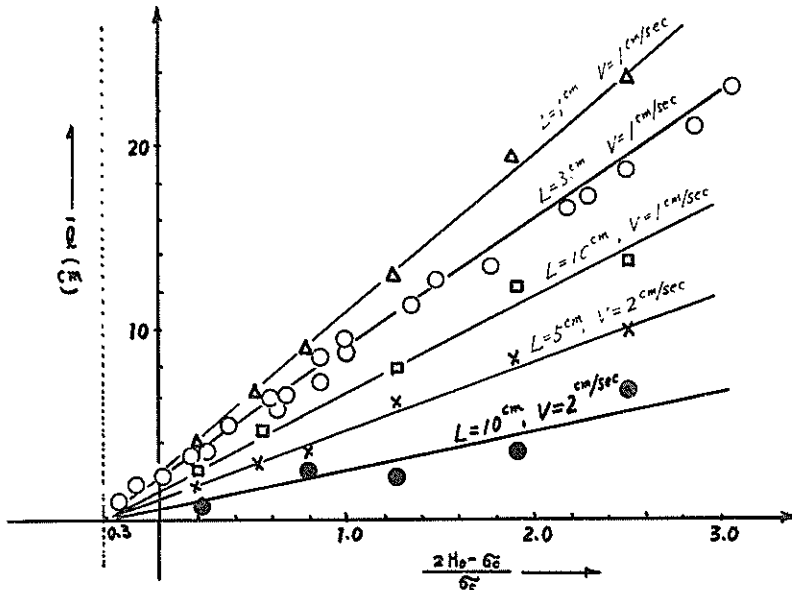


図-6 \bar{l} と $\frac{2H_0 - \sigma_c}{\sigma_c}$ との関係

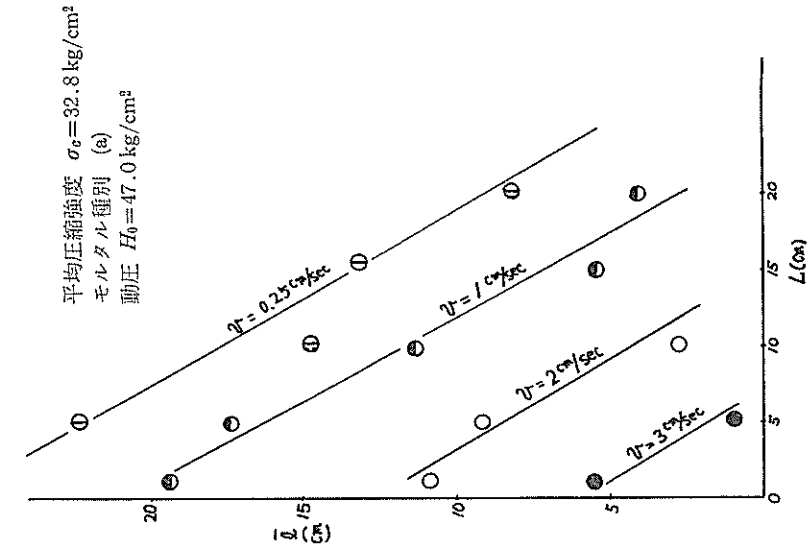


図-8 掘削平均深さ \bar{l} とノズルと試料との距離 L との関係

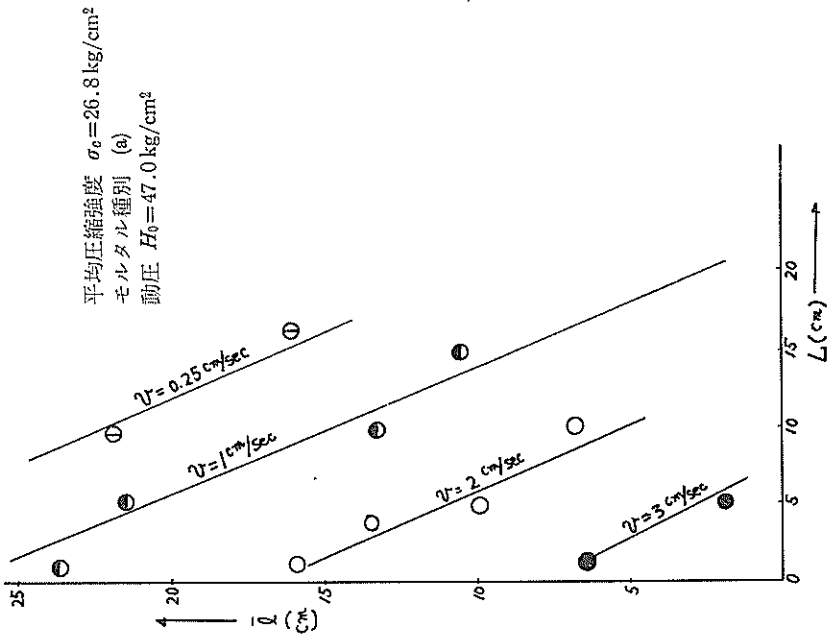


図-7 掘削平均深さ \bar{l} とノズルと試料との距離 L との関係

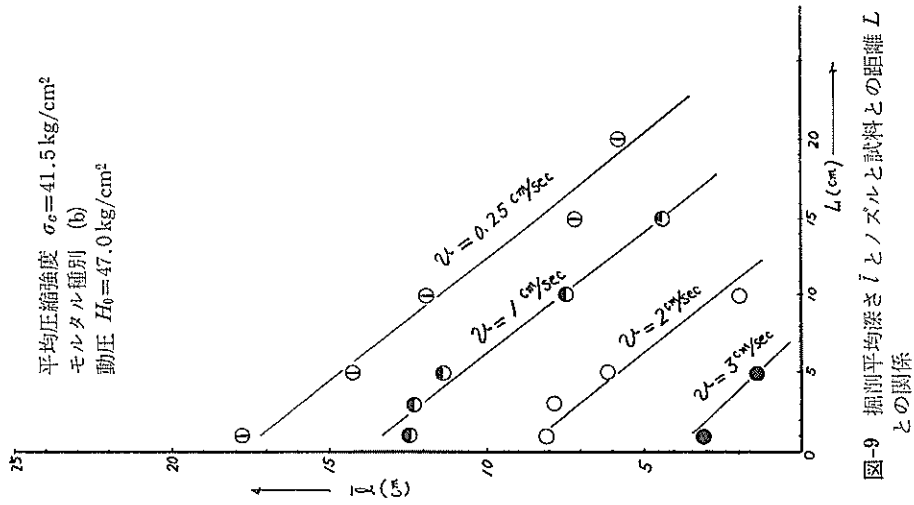


図-9 掘削平均深さ \bar{l} とノズルと試料との距離 L との関係

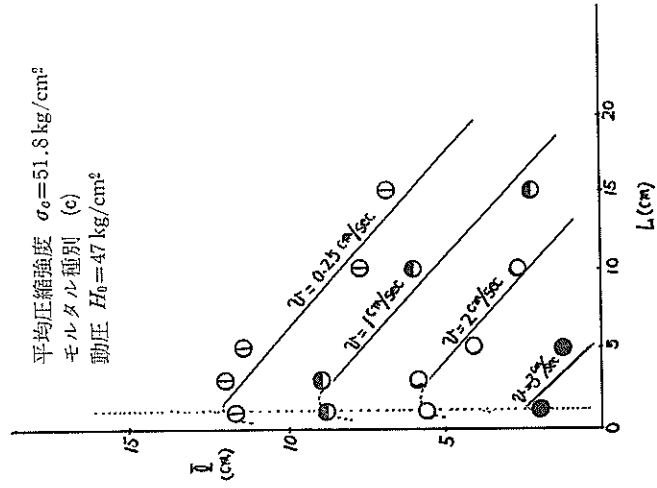


図-10 掘削平均深さ \bar{l} とノズルと試料との距離 L との関係

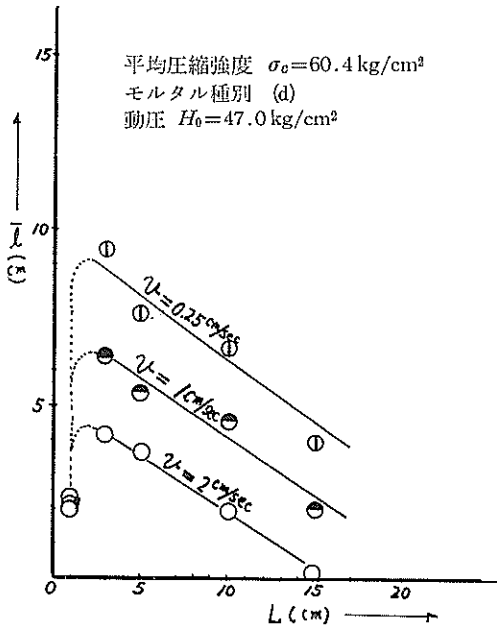


図-11 掘削平均深さ \bar{l} とノズルと試料との距離 L との関係

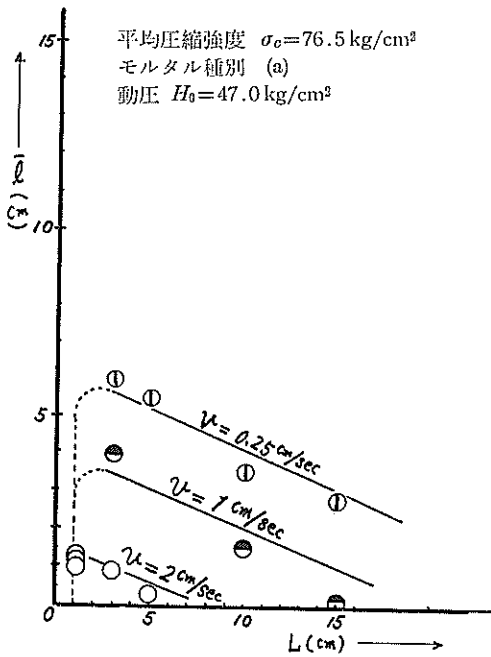


図-12 掘削平均深さ \bar{l} とノズルと試料との距離 L との関係

b) 掘削深さ \bar{l} と、ノズル口と試料との距離 L 、ノズル移動速度 v との関係

次に、 \bar{l} と L 、 v の関係を求めてみよう。まず、 \bar{l} と L との関係を調べるために、 σ_0 、 H_0 、 v を一定にしたとき、 \bar{l} と L がどのような関係があるのかを示したものが図-7~12 である。図-7~9 では、 \bar{l} と L には直線的な関係が見られ、図-10~12 では、ほぼ同様な直線的な関係が見られるが、 $L \leq 3$ のときは必ずしもその傾向が見られない。そこで、これらの図を 図-7~9 の掘削特性を表わす直線と関連づけるために、図-10~12 で、 $L \geq 3$ の区間の直線を $L=0$ の直線との交点まで延長してみる。すると各図における直線は、次のような形式で表現できるであろう。すなわち、

$$\bar{l} = -\alpha_1 L + K(v) \quad \dots (2.2)$$

(ここで、 α_1 、 $K(v)$ は σ_0 によって変化してくる)

ここで、 $K_1(v)$ は (2.2) 式であらわされる式のせつ

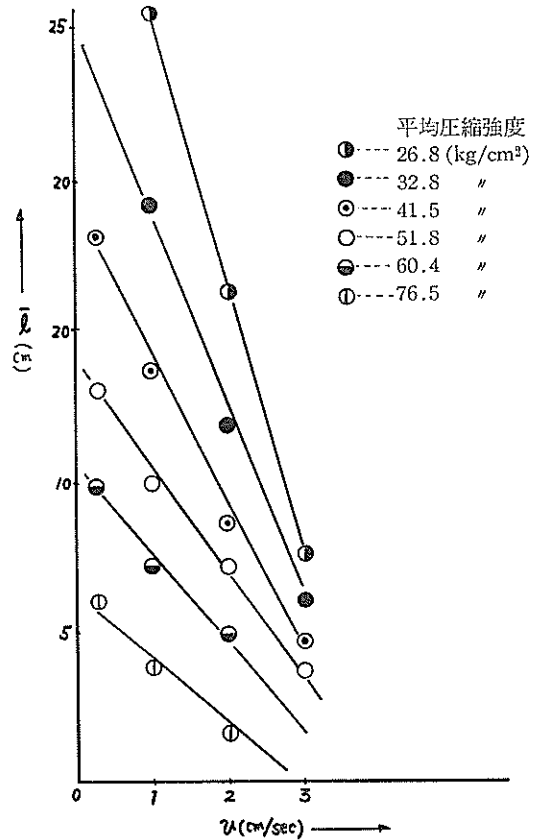


図-13 掘削平均深さ \bar{l} とノズル移動速度 v との関係

片である。もちろん、この値は実際の \bar{l} の値ではなく、この図より仮想して得られた値である。次に図-13は L が一定のとき、すなわち、ここでは $L=0$ で $H_0=47\text{ kg/cm}^2$ (一定) のとき、各々の値の σ_c のときの v と \bar{l} との関係を調べたものである。ただし、図-13では図-7~12までの $L=0$ の場合の値を仮想して、プロットしたものである。

次に、図-13より、各々のプロットした値は、直線関係

$$K(v) = -\beta_1 v + K_2 \quad \dots\dots(2.3)$$

とあらわされる。

ただし、この式では β_1 は各直線群の傾き、 K_2 は $v=0$ のときの値であるが、実際には $v=0$ で実験を行っていないからこの値も仮想値である。

さて、式(2.2)、(2.3)から図-7~12の各測定点を一つの式に表現するなら、(2.2)式に(2.3)式を代入することにより、

$$\bar{l} = -\alpha_1 L - \beta_1 v + K_2 \quad \dots\dots(2.4)$$

ただし、上式は次のような条件で成立すると考える。

すなわち、ノズル移動速度 v 、およびノズルと試料面までの距離 L の適用範囲は、

$$\begin{aligned} 0.25 \leq v \leq 3 \text{ (cm/sec)} \\ 15 \geq L \geq 1, \quad \sigma_c \leq 40 \text{ kg/cm}^2 \\ 15 \geq L \geq 3, \quad \sigma_c \geq 40 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

いま、図-10, 11, 12で示すように、モルタル試料の圧縮強度が高い場合には、 $L=0\sim 3\text{ cm}$ では試料が掘削されない傾向が見られる。これらの原因は、試料表面とノズルとの距離がこの程度の大きさであること、 $d=1.0\text{ cm}$ のノズルを使用したとき、噴流の構造からみて、A領域に試料が位置するため、噴射された水流が静的に作用して、モルタルの圧縮強度が高い場合には、それらを破碎することが不可能であるからと思われる。

次に、(2.4)式について、 α_1 、 β_1 、 K_2 について考慮してみよう。図-7~13からも明らかのように、これらの値は σ_c の大きさにより変化していることがわかる。また先にも述べたように、 \bar{l} と H_0 、 σ_c とには(2.1)式が成立していた。よって \bar{l} と H_0 、 σ_c 、 L 、 v とには、次のような関係が存在するであろう。すなわち、

$$\bar{l} = (-\alpha L - \beta v + K)(2H_0/\sigma_c - 0.7) \quad \dots\dots(2.5)$$

(ここに、 α 、 β 、 K は定数)

いま、この式を展開すると

$$\begin{aligned} = -\alpha(2H_0/\sigma_c - 0.7)L - \beta(2H_0/\sigma_c - 0.7)v \\ + K(2H_0/\sigma_c - 0.7) \end{aligned}$$

表-2 α 、 β 、 K の値を決定する表

	図-7~12 より			図-13 より			
	σ_c	α_1	α	β_1	β	K_2	K
A	26.8	1.2	0.41	8.5	3.0	32.5	11.6
B	32.8	0.94	0.43	6.8	3.1	24.6	10.1
C	41.5	0.61	0.38	5.1	3.2	19.0	12.2
D	51.8	0.46	0.38	3.4	3.0	14.0	12.5
E	60.4	0.32	0.37	2.8	3.2	10.5	12.2
F	76.5	0.21	0.41	1.5	2.9	6.0	11.6

となるが、これが式(2.4)に一致せねばならない。

この式と(2.4)式と比較すると、

$$\alpha(2H_0/\sigma_c - 0.7) = \alpha_1$$

$$\beta(2H_0/\sigma_c - 0.7) = \beta_1$$

$$K(2H_0/\sigma_c - 0.7) = K_2$$

となる。

これらの関係に図-7~13に示す各強度 σ_c における α_1 、 β_1 、 K_2 の値を代入して、 α 、 β 、 K の値を決定してみよう。表-2は、各図から得られた α_1 、 β_1 、 K_2 の値で、それと上式の関係から求められた α 、 β 、 K の値を代入したものである。

この表から α 、 β 、 K の平均値を求めると、

$$\alpha = 0.39, \quad \beta = 3.1, \quad K = 11.8$$

となる。よって掘削平均深さ \bar{l} と、 L 、 v 、 H_0 、 σ_c の関係は、 α 、 β 、 K を(2.5)式に代入することによって、

$$\bar{l} = (-0.39L - 3.1v + 11.8) \cdot (2H_0/\sigma_c - 0.7) \quad \dots\dots(2.6)$$

ただし、この式は d (ノズル口径) が 1 cm のときに求められた式である。

c) 掘削平均深さ \bar{l} とノズル口径 d との関係について

次に \bar{l} と d との関係を調査した図-14について、検討してみよう。この図からもわかるように $0.6 \leq d \leq 2.0\text{ cm}$ のノズルについては、

$$\bar{l} \propto d^{1.7} \quad \dots\dots(2.7)$$

の関係が認められる。

よって $d=1\text{ cm}$ のとき(2.6)式が成立したのであったから、 \bar{l} と H_0 、 σ_c 、 L 、 v 、 d との関係は、

$$\begin{aligned} \bar{l} &= (-0.39L - 3.1v + 11.8)(2H_0/\sigma_c - 0.7) \\ &\quad (d/d_1)^{1.7} \\ &= (-0.39L - 3.1v + 11.8)(2H_0/\sigma_c - 0.7)d^{1.7} \\ &\quad (d_1=1) \quad \dots\dots(2.8) \end{aligned}$$

と表わされる。

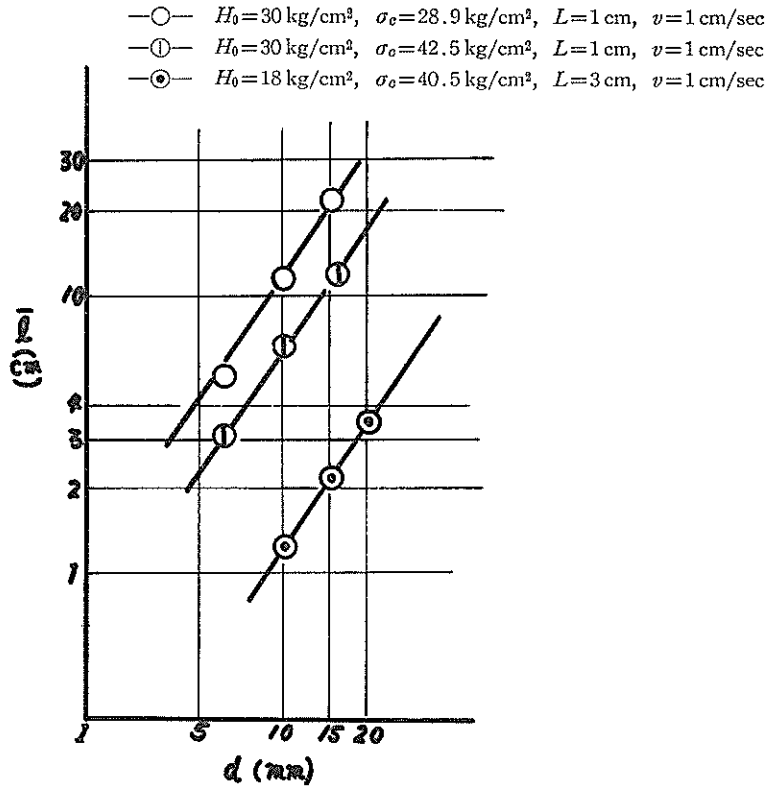


図-14 掘削平均深さ \bar{l} とノズル径 d との関係

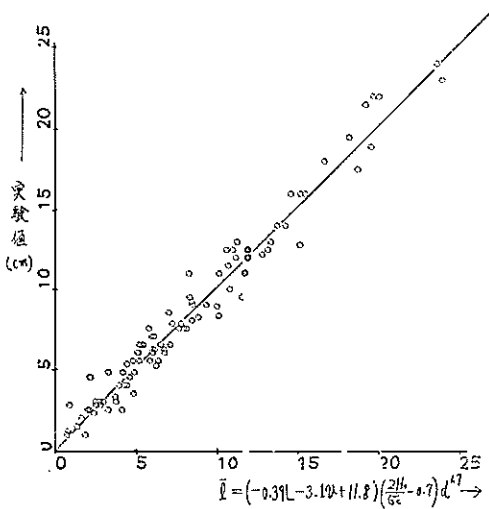


図-15 得られた実験値と実験式との比較

しかし、この式は $l > 0$ を満足してしかも、

$$24.5 \leq \sigma_c \leq 76.5 \text{ (kg/cm}^2\text{)},$$

$$20 \leq H_0 \leq 47 \text{ (kg/cm}^2\text{)},$$

$$0.25 \leq v \leq 3 \text{ (cm/sec)}, 1 \leq L \leq 15 \text{ (cm)},$$

$$0.6 \leq d \leq 2.0 \text{ (cm)}$$

の範囲で成立すると考えられる実験式である。なお、図-15 は、(2.8) 式と実験値を比較した図であるが、両者は比較的よく一致している。

2.3 ノズル移動掘削を繰り返し行なった場合の掘削深さ \bar{l}_N と繰り返し数 N との関係について

いままでの実験は、ノズルを一度だけ移動させて掘削させた場合の実験結果であるが、掘削深さを増大させるためには何度か同一個所を繰り返し掘削することがもう一つの方法である。図-16 は、同一個所を繰り返し掘削を行なった場合の繰り返し数 N と、その回数に対応した深さ \bar{l}_N との関係を図示したものである。ただしここでは、 H_0, L, v, d を一定とした場合について、各モルタル試料について行なった結果を示したものである。こ

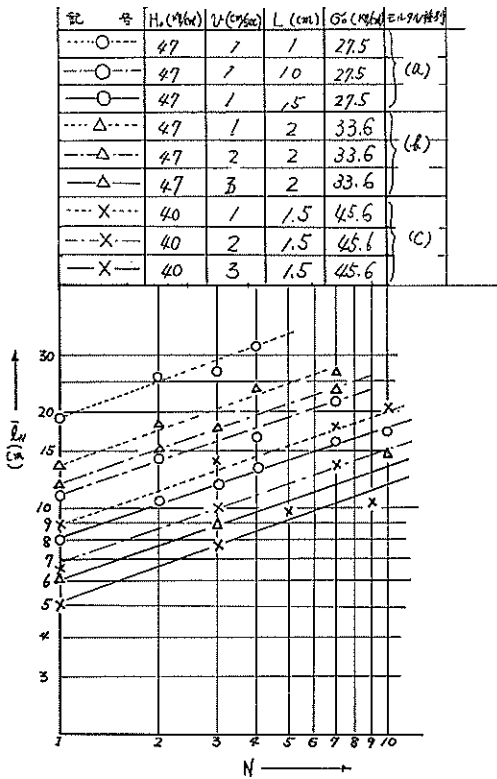


図-16 掘削回数 N と、掘削回数に対応する掘削深さ \bar{l}_N との関係

の図からも明らかなように、それぞれ異なった H_0 , L , v についてすべてのモルタル試料について

$$\bar{l}_N = \bar{l}_1 \cdot N^{0.37} \quad \dots\dots(2.9)$$

(ここで、 $\bar{l}_1 = N$ が 1 の場合における掘削深さ) の関係が成立することが知れる。ただし、この実験で使用したノズル口径は 1.0cm である。

3. 実験式についての応用

3.1 一定量エネルギーで掘削面積を最大にさせるための、ノズル移動速度について

単位時間に、一定量のエネルギーで、岩盤を掘削するとき、その掘削面積を最大にさせる方法について考慮してみよう。ここでいう掘削面積とは、ノズル移動距離(単位時間)に掘削深さを乗じたものである。

いま、ノズル移動速度 v のとき、掘削深さ \bar{l} は

$$\bar{l} = (-\alpha L - \beta v + K) \cdot K_1$$

$$(K_1 = d^{1.7} (2H_0/\sigma_c - 0.7), \alpha = 0.39, \beta = 3.1, K = 11.8)$$

このとき生じる掘削面積 \bar{A} は、

$$\bar{A} = K_1 (-\alpha L - \beta v + K) \cdot v$$

これが、単位時間に生じる掘削面積である。いまこの \bar{A} が最大になるノズル移動速度を求めよう。上式より、

$$v_e = \frac{K - \alpha L}{2\beta} \quad \dots\dots(3.1)$$

のときであることがわかる。この式からわかるように、この最大掘削面積を与えるノズル移動速度 v_e は、 L のみによって変わってくる事がわかる。

3.2 単位水エネルギーで、最大の掘削深さを得るための噴流水の動圧と試料の圧縮強度との関係について

次に、ノズルが単位長さだけ移動し、そのとき一定量のエネルギーを与えるとき、最大掘削深さを得るためには、噴流水の動圧と試料の圧縮強度との関係がどのような時であるか検討してみよう。

いま、毎秒 v cm でノズルが直線移動した場合、モルタル表面の単位長さあたりに要したエネルギーは、

$$E_v = \gamma QH/v$$

(γ = 水の単位体積あたりの重量, Q = ポンプ流量, H = 水頭)

いま、 E_v が一定、すなわち、

$$(\gamma QH/v) = C_1 \quad \dots\dots(3.2)$$

ここで、水頭 H を動圧 H_0 であらわし、 Q も

$$Q = C_a \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{2gH} d^2$$

$$= C_a \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2gH_0}{\gamma}} d^2 \quad \dots\dots(3.3)$$

(C_a = 流量係数)

とあらわして、(3.2) 式に代入して変形すると、

$$d = \frac{C_3}{H_0^{0.75}} \quad \dots\dots(3.4)$$

$$\text{ここに } C_3 = \left(\frac{C_1}{C_a \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2g}{\gamma}}} \right)^{0.5}$$

いま、 d , H_0 が上記の関係があるとして、一定量のエネルギーで最大の掘削深さを得る時の H_0 の値が、どのような時であるか調べてみよう。

(3.2) 式で与えられる水エネルギーにより得られる掘削深さは、

$$\bar{l} = (-\alpha L - \beta v + K) \cdot (2H_0/\sigma_c - 0.7) \cdot d^{1.7}$$

(ただし、掘削回数 $N=1$ とする)

したがって、ノズルが単位長さだけ移動するとき、単位エネルギーあたりの掘削深さは、

$$\begin{aligned} \bar{l}_u &= \frac{l}{E_v} \\ &= \frac{(-\alpha L - \beta v + K)(2H_0/\sigma_0 - 0.7) \cdot d^{1.7}}{\gamma QH/v} \end{aligned}$$

この式に、 $H=H_0/\gamma$ 、 Q も(3.3)式を代入すると、

$$\bar{l}_u = \frac{4(-\alpha L - \beta v + K) \cdot v}{C_a \pi \sqrt{\frac{2g}{\gamma}}} \cdot \frac{(2H_0/\sigma_0 - 0.7)}{d^{0.3} H_0^{1.5}}$$

いま、この式で d に(3.4)式の関係式を代入すると、

$$\bar{l}_u = C_4 \cdot \frac{(2H_0/\sigma_0 - 0.7)}{H^{1.275}}$$

$$\left(\text{ここに } C_4 = \frac{4(-\alpha L - \beta v + K)v}{C_a \pi \sqrt{2g/\gamma} C_3^{0.3}} \right)$$

この式を H_0 について微分すると、

$$\frac{\partial \bar{l}_u}{\partial H_0} = - \frac{1.82 C_4 (H_0 - 1.15 \sigma_0)}{\sigma_0 H_0^{2.275}}$$

$$\frac{\partial \bar{l}_u}{\partial H_0} = 0 \text{ を満足して、} \bar{l}_u \text{ を最大にする } H_0 \text{ は、}$$

$$H_0 = 1.15 \sigma_0$$

として求まる。すなわち一定量のエネルギーで最大掘削深さを得るには、上記の関係式を満足する動圧を選ぶとよい。

4. ま と め

以上の実験結果を要約すると、

- ① ノズルを移動させてモルタル試料を掘削させた場合、ある一定の条件のもとで、モルタル構成の状態の如何にかかわらず、式(2.8)および(2.9)で表わされる実験式を得た。しかし、これは圧縮強度の高い($\sigma_0=50 \text{ kg/cm}^2$)以上の試料については、ノズル口が試料よりある程度離れていないと成立しない。
- ② 一定量の水エネルギーで掘削面積を最大させるために、ノズル移動速度は、(3.1)式であらわされるが、これはノズルからの距離によって定まることが

わかる。

- ③ 単位水エネルギーで、最大の掘削深さを得るためには噴流水の動圧と試料の圧縮強度との関係がほぼ

$$H_0 = 1.15 \sigma_0$$

のとき、すなわち、ノズル出口動圧と圧縮強度の値がほぼ同一の値のときと考えられる。

以上が今回の実験で明らかになった主な点であるが、今回は主として、掘削深さを対象とした実験を行なったため、実際の掘削形状、破砕状況などについての検討は行っていない。それは、先にも述べたように、水噴流による岩盤破砕現象はかなり複雑で、それを理論的に求めることより、実用上のことを主体とした検討の方がより意義があるのではないかと思われたからである。次に、いままでの実験では、使用している高压ポンプが発生し得る圧力が、 50 kg/cm^2 前後の能力しかないので、掘削し得るモルタル試料の強度が約 90 kg/cm^2 以下のものしか使用できなかった。これでは実用上の意味が乏しい感じを与えるが、今回まではやむえなかった。今後は、超高压用ポンプを導入して、水噴流によるさらに能率的な岩盤破砕方法について、実験、解析を試みる予定である。

参 考 文 献

- 1) 高压噴流水の構造に関する実験結果およびモルタル試料掘削実験結果について：藤井喜一郎，守口照明，近藤 基，港湾技研資料 No. 60.
- 2) 水噴流による水中の岩盤の理論的破砕過程について：藤井喜一郎，守口照明，港湾技術研究所報告，第8巻第2号.
- 3) 高速噴流水による岩石の破砕：山門憲雄，横田 章，土木学会論文集，第133号.
- 4) 高速連続水噴流による固体のかい食と水噴流の構造について：横田 章，山門憲雄，日本機械学会論文集，249号.

(1970.3.31 受付)